

DOI: 10.11779/CJGE202003014

张开度影响的水平裂隙类岩试件破断试验与分析

曾佳君, 张志军, 张栩栩, 蒲成志*

(南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 为探究张开度影响的水平裂隙岩体破断机理, 利用水泥砂浆制备不同张开度水平单裂隙类岩体试件, 基于RMT-150B岩石力学试验机对制备的类岩体试件进行单轴加载试验。结果表明: 同一预制裂隙长度下, 随着裂隙张开度的减小, 微裂纹萌生位置由预制裂隙中部向尖端转移。为验证此现象, 基于PFC数值仿真平台的平行黏结接触单元构建了裂隙体数值模型进行分析, 在数值计算边界条件与试验测试环境相一致的条件下, 得到了与试验测试结果相一致的微裂纹起裂模式与破断特征。为进一步探究水平裂隙岩体微裂纹起裂扩展机制, 结合微裂纹起裂扩展过程中数值模型颗粒位移场演化规律, 基于裂纹面变形屈服特征, 提出了固支梁简化计算力学模型, 对不同张开度下水平裂隙岩体出现的微裂纹起裂扩展机制进行了分析和阐释。

关键词: 类岩体试件; 裂隙张开度; 水平裂隙; 微裂纹起裂特征; 数值模拟

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)03-0523-10

作者简介: 曾佳君(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: zengjiajun93@163.com。

Fracture test and analysis of horizontal fissure rock-like specimens influenced by apertures

ZENG Jia-jun, ZHANG Zhi-jun, ZHANG Xu-xu, PU Cheng-zhi

(School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to explore the fracture mechanism of horizontal fissure rock mass with different apertures, single-fissure rock mass specimens with different apertures are prepared by using cement mortar. The uniaxial loading tests are carried out on the prepared rock mass specimens based on the RMT-150B rock mechanics testing machine. The results show that under the same length of prefabricated fissure, with the decrease of fissure apertures, the initiation position of microcracks shifts from the middle of prefabricated fissure to the tip. To verify this phenomenon, a parallel bonded contact element based on PFC numerical simulation platform is used to establish a numerical model for fissure body for analysis. Under that condition, the boundary conditions of numerical calculation are consistent with the test environment, the crack initiation modes and fracture characteristics which are consistent with the test results are obtained. In order to further explore the initiation and propagation mechanism of micro-cracks in horizontally fissured rock mass, based on the yield characteristics of crack surface deformation, the evolution law of particle displacement field in the numerical model of micro-crack initiation and propagation is considered, a simplified model for fixed beam is proposed, and the mechanism of micro-crack initiation and propagation in horizontally fissured rock mass with different apertures is analyzed and explained.

Key words: rock-like specimen; fissure aperture; horizontal fissure; micro-crack initiation characteristic; numerical simulation

0 引言

岩体中存在裂隙、节理、弱面及断层等不同尺寸、不同赋存状态的原生不连续面, 这些不连续结构面弱化了岩体的强度和刚度^[1]。在实际工程中, 承受外部荷载下的岩体将于已有裂隙、节理和弱面等不连续面附近产生新的裂纹, 新裂纹的萌生、扩展和贯通将会导致岩体失稳破坏^[2], 因此, 研究裂隙岩体裂纹起裂、扩展特征以及裂纹萌生的力学响应机制在学术界和工程界都尤为重要。

近年来, 国内外学者对单轴压缩下单裂隙岩体裂纹起裂、扩展和破坏模式进行了大量试验和数值模拟研究, 取得了可喜的研究成果^[3-9]。蒋明镜等^[10]将自定义的胶结接触模型嵌入离散元程序, 建立了单裂隙试

基金项目: 国家自然科学基金项目(51704168, 51774187); 中国博士后科学基金项目(2016M602417); 湖南省研究生科研创新课题项目(CX2017B519)

收稿日期: 2019-06-17

*通信作者(E-mail: puchengzhi@foxmail.com)

样模型进行单轴压缩数值试验，并结合理论分析对单裂隙试样应力场进行了研究；袁媛等^[11]、左江江等^[12]、郭奇峰等^[13]利用数字图像相关方法对单裂隙类岩体材料单轴压缩过程中全局应变演化进行了分析，得出了不同倾角下裂隙类岩体材料的裂纹起裂、扩展和破坏规律；Liu 等^[14-15]、Jin 等^[16]制备了单裂隙类岩体试件并进行单轴压缩试验，结合离散元程序研究了不同倾角下裂隙类岩体试件的裂纹起裂、扩展和破坏模式，同时，对裂纹发育过程中出现的颗粒位移场进行了分析。上述研究结果表明，学者们大多数从不同的分析方法和手段对裂隙岩体裂纹起裂、扩展和破坏模式进行研究，而裂隙参数的变化对裂隙岩体裂纹起裂、扩展和破坏模式即存在不同影响，且自然界和工程界岩体中裂隙错综复杂，形态不一，因此，研究裂隙参数变化对裂隙岩体裂纹演化特征及规律的影响十分必要。

分析上述研究成果发现，单轴压缩下水平单一张开裂隙岩体的裂纹基本起裂于预制裂隙中部附近，但部分文章中试验结果显示：水平裂隙试件裂纹起裂于预制裂隙尖端^[17-18]。Miao 等^[17]研究成果中，单一非填充裂隙岩体预制裂隙中部附近出现拉伸裂纹，当裂隙试件被水泥和树脂材料填充后，预制裂隙面从张开到近似闭合，水平裂隙试件裂纹起裂于预制裂隙尖端；蒲成志等^[18]开展了水平裂隙类岩试件单轴压缩试验，出现了预制裂隙中部起裂和尖端起裂两种不同状态，其试验中裂隙张开度较小（0.4 mm），且试验中由于预制裂隙的制备过程可能导致预制裂隙张开度不一，从而导致水平裂隙试件起裂模式的差异。

为了研究裂隙张开度对单一水平裂隙岩体裂纹起裂、扩展和破坏模式的影响，本文通过制备不同张开度水平裂隙类岩体试件进行单轴加载试验，裂隙张开度均为 1 mm 以下，并基于颗粒流程序 PFC^{2D}建立水平裂隙体模型开展单轴压缩数值模拟以对试验结果进行验证和完善；为了深入研究不同张开度水平裂隙试件裂纹起裂机制，建立固支梁模型对水平裂隙试样起裂机制进行分析，同时采用数值模拟对梁模型分析结果进行验证；最后，结合数值模拟从预制裂隙面压缩变形角度对张开度影响的水平裂隙试件起裂特征进一步解释。

1 试验方案

本次试验的水泥砂浆材料按 425 标号白水泥：细

表 1 类岩材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock-like materials

试件类型	密度/(kg·m ⁻³)	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)
类岩体试件	2145	33.28	7.63	0.211	2.64	6.49	33.75

砂：水=5:5:2 的质量比配合制备而成，为了消除河砂中土对试验结果的干扰，对细砂进行 1.25 mm 孔径筛子筛分再水洗、晾干处理。将不同厚度钢片表面涂油并预置入模具内，待试件初凝后拔出预埋钢片以形成不同张开度预制裂隙，试件振捣成型 24 h 后拆模，将合格试件放入养护箱标准养护 28 d。

试件外形尺寸高×宽×厚为 200 mm×150 mm×50 mm，裂纹长度为 $2a=30$ mm，裂隙张开度 b 分别为 0.1, 0.2, 0.4 和 0.8 mm，共计 4 种张开度，预制裂隙倾角水平，不同工况试件以及完整试件各制备 8 个，以便减小数据离散性带来的误差。

裂隙试件制备示意图见图 1。

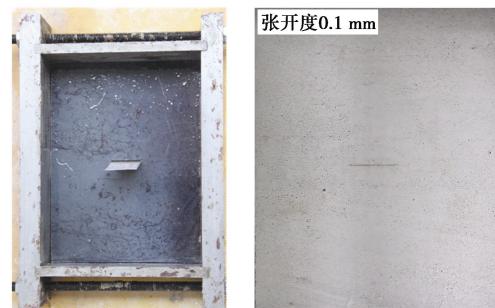


图 1 裂隙试件制备示意图

Fig. 1 Preparation of fissure specimen

单轴压缩室内试验采用 RMT-150B 岩石力学试验机，结合试件尺寸对试验机进行改装（如图 2），改装后的试验机能够实现对矩形试件进行力及位移控制加载。本次试验加载方式为力控，加载速度为 200 N/S。在相同试验条件下，对水泥砂浆制备的完整试件进行单轴压缩、巴西劈裂和直剪试验，整理出类岩体材料的物理力学参数见表 1。



图 2 RMT-150B 岩石力学试验机

Fig. 2 RMT-150B rock mechanics test machine

2 试验结果分析

2.1 裂纹起裂和扩展模式分析

在进行室内试验时, 采用高速摄像机实时拍摄记录裂隙试件裂纹起裂扩展过程, 并采用图像编辑软件对已拍摄视频进行图像帧数截取处理。不同张开度水平裂隙试件的裂纹起裂模式见图3。图3显示: 加载过程中, 0.1 mm 张开度裂隙试件裂纹起裂于预制裂隙两尖端, 张开度为 0.2 mm 时微裂纹萌生于预制裂隙右尖端和中部, 0.4 mm 和 0.8 mm 张开度裂隙试件微裂纹萌生于预制裂隙中部且沿着受力方向扩展。说明随着裂隙张开度的增加, 裂纹起裂位置由预制裂隙尖端向预制裂隙中部转移。

试验结果表明: 水平裂隙试件裂纹起裂时中部拉伸裂纹扩展到一定路径后由于拉应力不足而停止扩展。观看录像和按帧数处理的图像, 将中部拉伸裂纹扩展到最大路径时刻的图像绘制于图4, 使用绘图软件将中部拉伸裂纹扩展的竖向高度根据比例计算并同时标注于图4中。结合录像和图4发现: 不同张开度水平裂隙试件初始起裂裂纹在扩展一段时间后均滞

停, 在保持滞停状态一定时间后初始萌生裂纹从裂尖开始发生闭合现象, 肉眼可见的裂隙出现缩短, 随后出现剪切裂纹。张开度 0.1 mm 裂隙试件剪切裂纹并未萌生于预制裂隙尖端, 而是以远场裂纹的形式于试件斜对角出现。观察预制裂隙中部萌生的拉伸裂纹发现, 张开度为 0.2 mm 及以上时, 中部拉伸裂纹扩展长度随张开度增大而增加, 推测出现此现象的原因是: 0.2 mm 张开度裂隙试件中部拉伸裂纹起裂并扩展后, 预制裂隙中部出现较大竖向位移, 预制裂隙面开始接触, 抑制了拉伸裂纹的发育; 当张开度为 0.4 mm 和 0.8 mm 时, 裂隙张开度较大, 预制裂隙面接触需要拉伸裂纹扩展更长甚至于预制裂隙面不出现接触现象, 拉伸裂纹可以得到充分发育, 但是发育到一定程度后会因拉应力不足而扩展滞停, 因此, 虽然中部拉伸裂纹随裂隙张开度增加而出现增大, 但 0.4 mm 和 0.8 mm 上部拉伸裂纹扩展长度相差不大。

2.2 破坏模式分析

不同张开度水平裂隙岩体的破坏模式见图5, 可以观察到, 不同张开度水平裂隙试件的最终破坏模式均以剪切裂纹与预制裂隙面、试件加载面相互贯通的

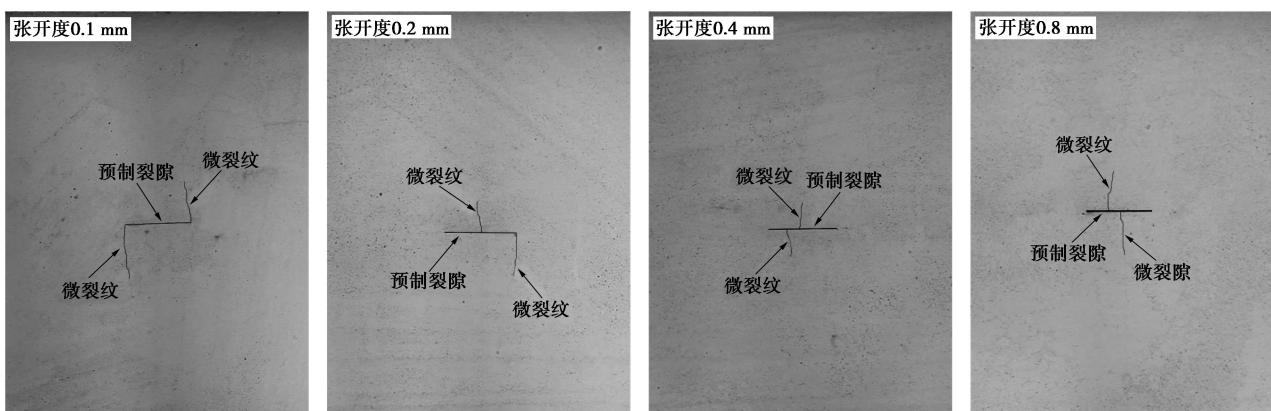


图3 不同裂隙张开度下水平裂隙试件裂纹起裂模式

Fig. 3 Crack initiation modes of horizontal fissure with different fissure apertures

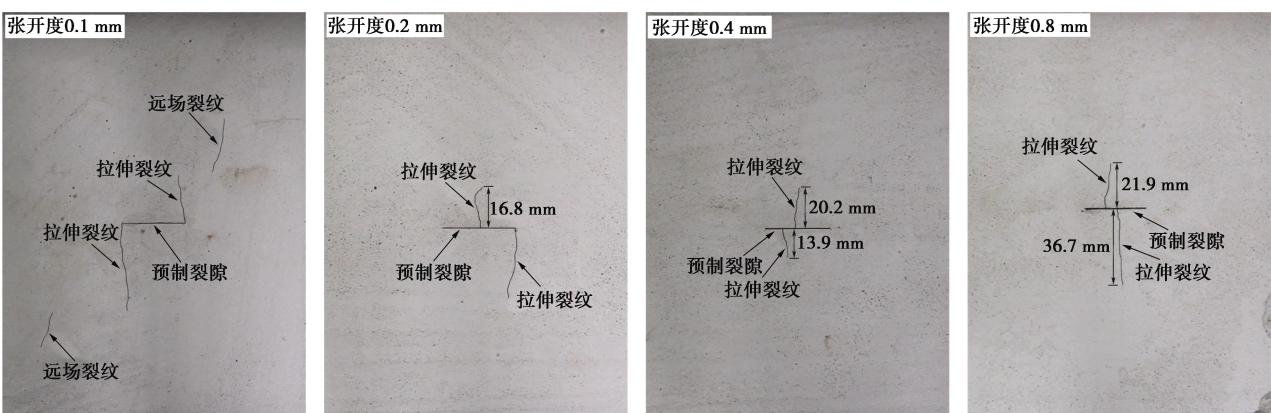


图4 水平裂隙类岩试件裂纹扩展路径

Fig. 4 Crack growth paths of horizontally fissured rock-like specimens

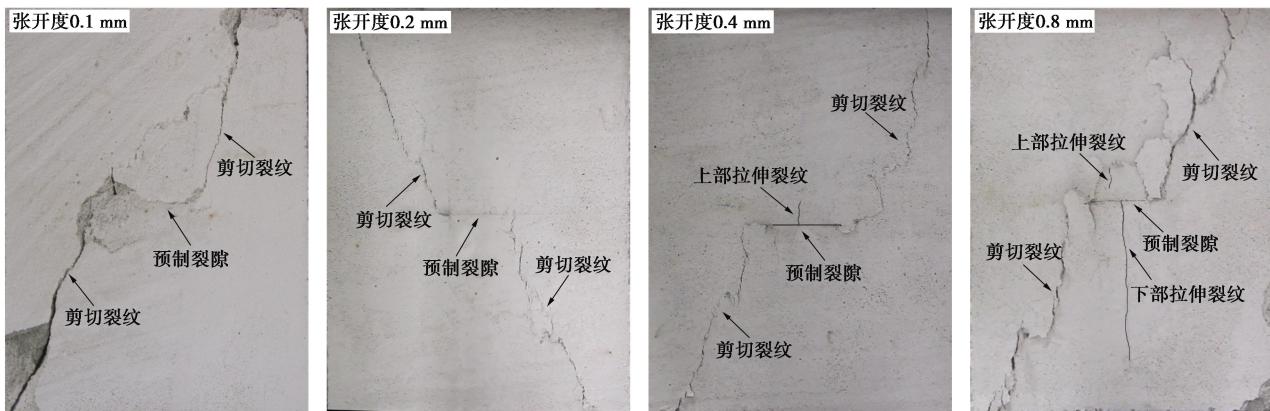


图 5 不同裂隙张开度下水平裂隙试件破坏模式

Fig. 5 Failure modes of horizontally fissured specimens with different fissure apertures

表 2 数值模型微观力学参数

Table 2 Microscopic parameters of numerical model

粒径/mm	颗粒接触模量/GPa	颗粒刚度比	颗粒摩擦系数	黏结模量/GPa	黏结刚度比	黏结摩擦系数	黏结抗拉强度/MPa	黏结内聚力/MPa
0.7~1.05	4.5	2.5	0.4	4.5	2.8	0.4	13.5 ± 2.7	13.5 ± 2.7

对角剪切破坏为主，但从裂纹萌生扩展到裂纹破坏模式过程中可以发现：0.1 mm 和 0.2 mm 张开度裂隙试件的尖端微裂纹在最终破坏模式中已经消失；0.4 mm 张开度裂隙试件的上部拉伸裂纹部分闭合，下部拉伸裂纹已经消失；0.8 mm 张开度裂隙试件的上部拉伸裂纹也出现闭合缩短现象，但下部拉伸裂纹增长。通过对录像的反复查看，发现水平裂隙初始微裂纹的闭合缩短现象出现在剪切裂纹萌生前后，随着剪切裂纹的扩展，最初萌生的裂纹闭合现象逐渐显著。因此，水平裂隙试件初始萌生裂纹的闭合缩短甚至消失极可能是由于剪切位移的推动，使得预制裂隙面附近萌生的竖向拉伸裂纹逐渐闭合。

3 数值模拟分析

3.1 数值模型建立及细观参数标定

为了分析试验中水平裂隙类岩石试件裂纹起裂的微观机理，本文采用颗粒流程序 PFC^{2D}对裂隙模型进行单轴压缩数值模拟试验。颗粒流程序中包含两种基本模型：接触黏结模型和平行黏结模型。大量研究结果表明^[14-16, 19-21]，平行黏结模型下的数值模型破坏模式能够良好吻合岩石和类岩石材料，且可控性以及适用性更强，因此，本文选用平行黏结模型进行数值模拟。

利用 PFC^{2D}建立了二维数值模型，二维模型尺寸长×高为 150 mm×200 mm，通过“试错法”对模型微观参数进行标定，本次数值模拟选用实验室测试中得到的应力-应变曲线、峰值强度、弹性模量以及破坏模式为目标变量进行参数标定^[14]，直到数值模型宏观

力学特性与室内试验基本一致。完整数值模型粒子个数为 44285 个，数值模拟结果与室内试验结果对比见图 6。试验中完整试件应力应变曲线有明显的初始压密、弹性变形和塑性屈服 3 个变形阶段，且初始压密及塑性屈服阶段长，这是因为水泥砂浆类岩石试件内部存在较多微空隙等缺陷，而数值模拟曲线上升段近似直线增长。完整数值模型峰值强度为 33.10 MPa，弹性模量为 7.49 GPa，破坏模式与试验结果基本一致，说明此微观参数下的数值模型模拟结果能较好的反映试验中岩体的宏观力学特性。数值模型细观力学参数见表 2。

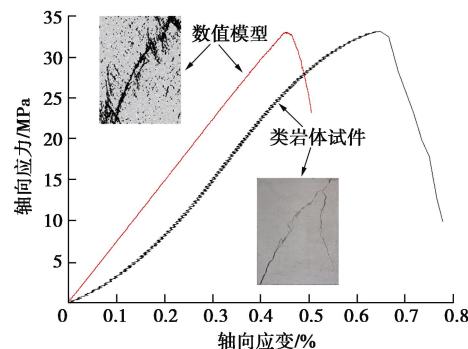


图 6 数值模拟与室内试验结果对比

Fig. 6 Comparison between numerical simulations and laboratory test results

3.2 起裂模式与位移场分析

研究结果表明，裂纹两侧细观颗粒位移场变化揭示了初始裂纹面附近裂纹的萌生状态和受力特征^[16, 19, 22-23]。数值模拟中颗粒受力主要出现 3 种位

移场类型^[23], 即拉伸断裂下的I型位移场、剪切断裂下的II型位移场和拉伸-剪切混合断裂下的III型位移场, 见图7。笔者对不同张开度水平裂隙数值模型单轴压缩下裂纹起裂模式和初始裂纹周边细观颗粒位移场进行监控并记录, 见表3。可以观察到, 裂隙模型的裂纹起裂状态受裂隙张开度的影响发生变化: 张开度从0.1 mm到0.8 mm变化时, 裂隙模型的起裂步数依次为55280, 48520, 47010和42500步(考虑类岩体的颗粒黏结模型, 裂纹起裂^[24]为模型中微裂纹数量达到峰值强度时裂纹数量的0.25%), 对应的起裂应力依次为12.21, 10.83, 10.28和9.79 MPa。随着裂隙张开度的增加, 裂纹起裂位置由预制裂隙尖端向预制裂隙中部转移。这与试验结果相一致。

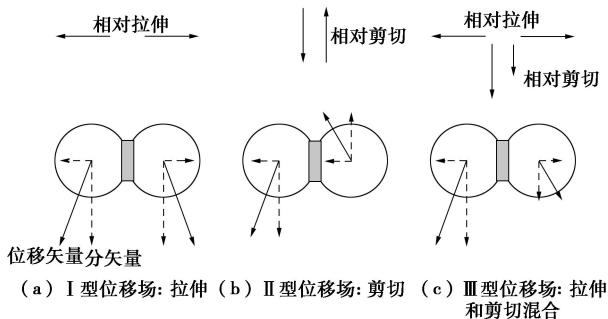


图7 位移矢量定义的3种主要位移场类型

Fig. 7 Three types of displacement fields defined by displacement vector

从裂纹面颗粒位移场来看, 裂隙模型张开度大于0.1 mm时, 预制裂隙面中部附近出现明显I型位移场引起的拉伸断裂, 位移矢量方向如图7(a)所示, 揭示了试验过程中裂隙面中部拉伸裂纹产生的微观机理; 当裂隙张开度为0.1 mm时, 预制裂隙左尖端下方出现如图7(b)所示的剪切断裂现象, 预制裂隙右尖端上下均出现了I型位移场引起的拉伸裂纹, 而裂隙面中部颗粒位移矢量几乎与初始裂纹面平行, 说明预制裂隙面已经出现闭合现象, 裂隙中部应力集中现象不明显, 微裂纹于预制裂隙尖端起裂, 这与试验测试结果相一致。

4 力学模型与数值模拟验证

4.1 力学模型

裂隙体数值计算模型中颗粒体运动矢量表明: 预制裂隙中部拉伸裂纹的萌生, 是由于均布压应力作用下, 导致预制裂隙面发生挠曲变形, 并在挠曲位移最大的裂隙面中部产生超过材料抗拉强度的拉应力引起的。为此, 笔者将张开裂隙一侧的裂隙面简化为梁模型^[25], 尝试揭示微裂纹萌生的力学机理。

预制裂隙位于试件几何中心, 且预制裂隙长度和

试件宽度比为1/5, 当预制裂隙面压缩变形时, 预制裂隙尖端的颗粒和黏结将对其转动产生约束作用, 导致裂隙试件在单轴压缩过程中预制裂隙尖端存在难压密三角区域, 如图8所示, 因此, 笔者将梁模型细化为均布荷载作用下两端固定的梁模型(以下简称“固支梁”模型), 如图9所示。

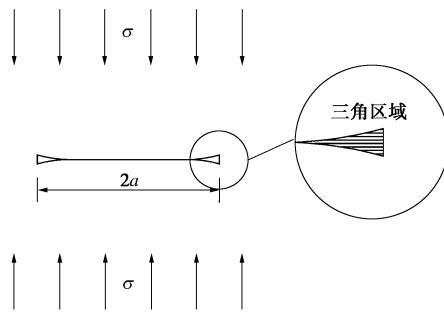


图8 压缩闭合状态下预制裂隙尖端三角区域

Fig. 8 Triangular region of prefabricated fissure tip under compression closed state

图9中固支梁在均布竖向荷载作用下, 跨中弯矩及挠度最大, 此位置拉应力最大, 本文将拉应力达到材料屈服强度时的跨中挠度定义为临界挠度。

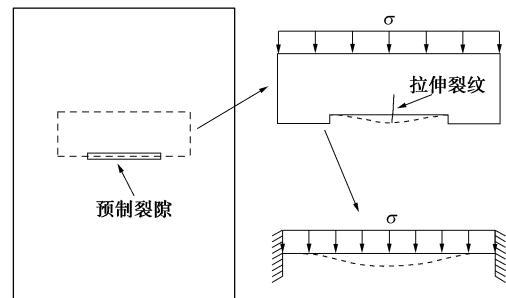


图9 固支梁模型及其挠度曲线

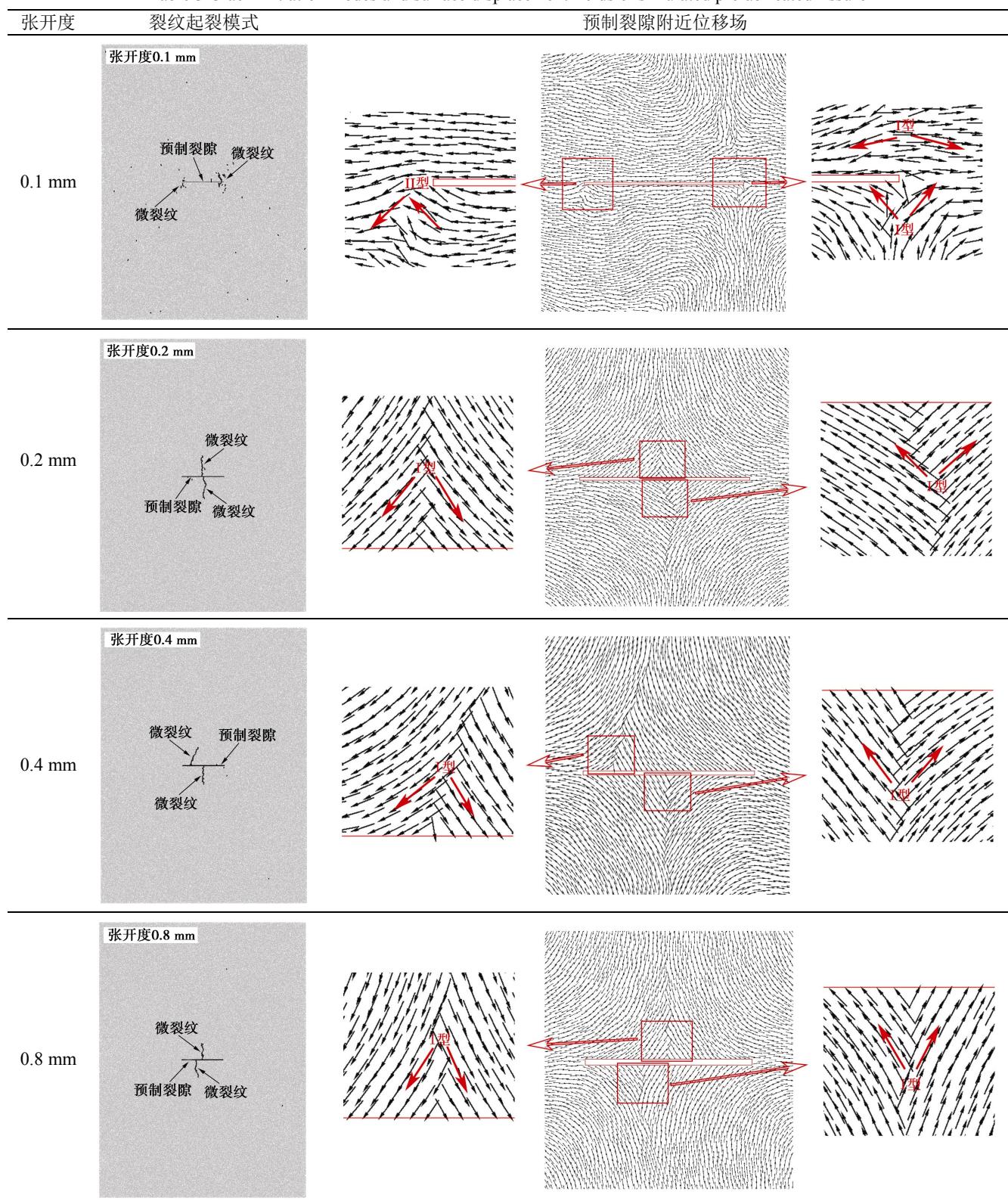
Fig. 9 Fixed-beam model and deflection curve

当预制裂隙张开度较小(小于两倍临界挠度)时, 预制裂隙上下面挠曲变形达不到临界挠度值, 跨中最大拉应力小于材料抗拉强度, 微裂纹发育的驱动力由跨中拉应力转化为尖端压应力, 相应地, 初始微裂纹萌生位置由预制裂隙中部向两端转移; 因此0.1 mm张开度裂隙岩体在裂纹萌生前即出现预制裂隙面接触闭合现象, 微裂纹起裂于预制裂隙两尖端。随着预制裂隙张开度的增加, 当其超过两倍临界挠度值时, 中部拉伸裂纹萌生前并未出现裂隙面接触闭合现象, 受压下的预制裂隙面挠曲变形能够得到充分发挥, 此时, 固支梁模型跨中拉应力超过材料抗拉强度, 中部萌生拉伸裂纹。因此出现随预制裂隙张开度增大, 微裂纹起裂位置由两端向中部转移的试验现象。

根据结构力学解, 受均布荷载作用的两端固支梁模型最大挠度 f 在跨中, 为

表 3 数值模拟水平裂隙试件裂纹起裂模式以及预制裂隙附近位移场状态

Table 3 Crack initiation modes and surface displacement fields of simulated prefabricated fissure



$$f = \frac{q(2a)^4}{384EI} \quad . \quad (1)$$

式中 q 为作用于梁上的均布荷载; a 为梁的半长; E 为弹性模量; I 为梁的截面惯性矩。

弯矩作用下, 截面最大拉应力表达式为

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad , \quad (2)$$

式中, M 为固支梁模型跨中弯矩, W 为固支梁模型截面抵抗矩。

将式 (1), 以及固支梁模型跨中弯矩和截面抵抗矩表达式代入式 (2), 可以得到固支梁模型跨中拉应

力表达式为

$$\sigma = \frac{384EI}{4b'h^2} \cdot \frac{f}{(2a)^2} \quad . \quad (3)$$

式(3)中, b' 为梁截面宽度, h 为梁截面受力高度。式(3)表明: 当裂隙体材料抗拉强度为常数时, 临界挠度与梁长的平方成正比; 当梁长为固定值时, 初始微裂纹发育时的临界挠度也将是定值。

4.2 数值模拟分析验证

如表3数值模拟结果所示, 预制裂隙张开度处于0.1~0.2 mm之间时, 微裂纹萌生位置处于预制裂隙尖端向中部附近转移的过渡阶段。观察式(1)发现, 在固支梁截面属性和受力状态保持一致条件下, 梁跨中挠度随梁长增加而增大, 相应地, 如式(3)所示, 随着梁长度的增加, 临界挠度增大, 即其拉应力达到其屈服强度时的挠度增大; 跨中挠度保持不变情况下, 固支梁模型跨中最大拉应力将随梁长增加而减小。该理论表明: 在张开度保持不变条件下, 随着预制裂隙长度的增大, 初始微裂纹起裂位置将从预制裂隙中部向裂尖转移。

为了验证固支梁模型在解析水平裂隙微裂纹起裂机制方面的适用性, 本文在前述裂隙体模型基础上, 通过改变数值模型中0.2 mm张开度裂隙的长度, 获

得不同裂隙长度数值分析模型, 在相同数值计算条件下, 对其进行计算和分析。为保证裂隙长度改变后的数值模型满足固支梁模型条件, 即不会出现裂隙长度增加而带来裂隙体模型中裂隙长与试件宽之比的变化, 在生成不同长度裂隙体模型的同时, 按裂隙长度比值缩放数值模型尺寸。因此, 生成张开度为0.2 mm, 裂隙长度为40 mm和50 mm的数值模型, 相应的试件尺寸按4/3和5/3增大, 其他参数保持不变, 具体参数见表4, 其他参数同表2所示。

表4 数值模型参数

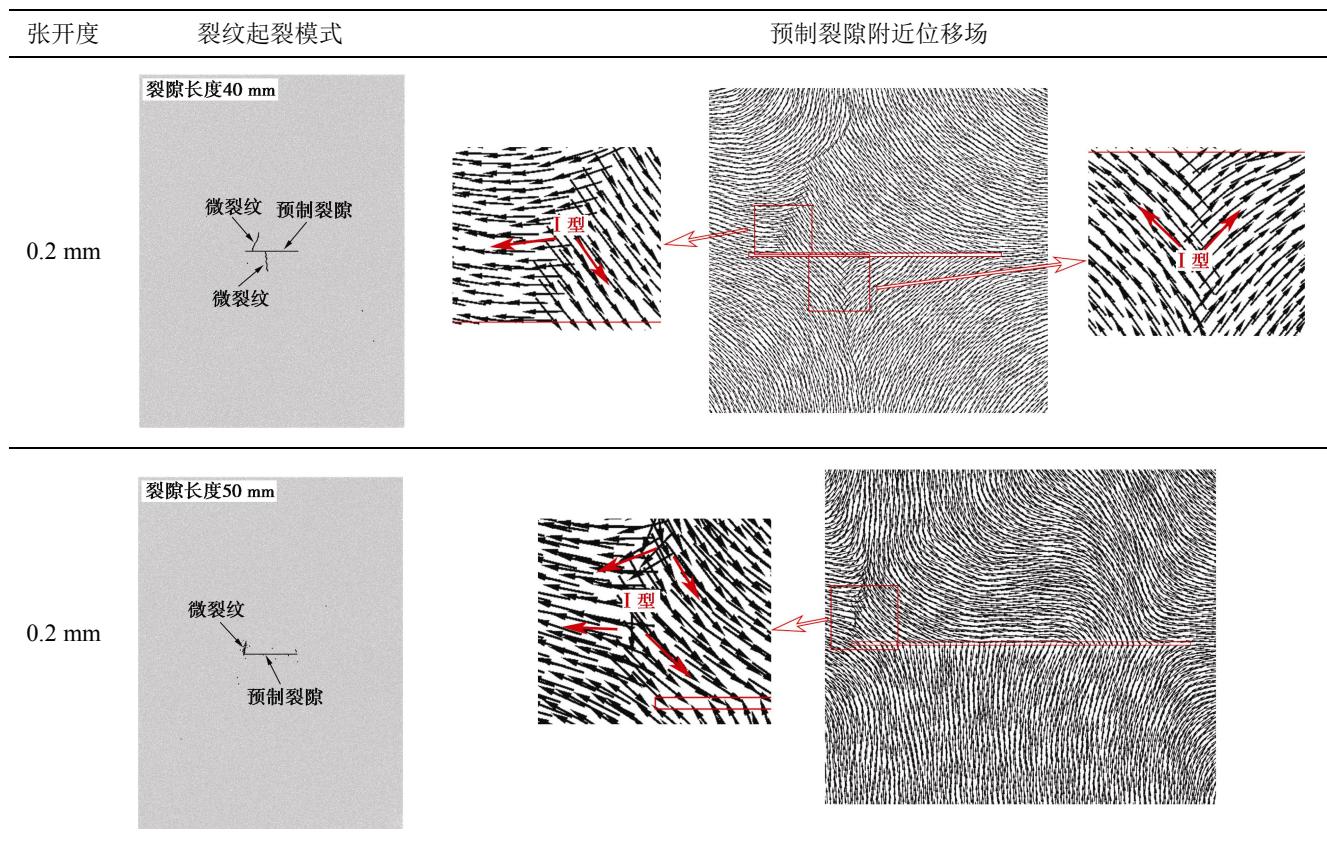
Table 4 Parameters of numerical model

裂隙长度 /mm	模型尺寸 /(mm×mm)	颗粒数 /个	裂隙张开度 /mm
40	200×267	78780	0.2
50	250×333	123034	

改变裂隙长度及模型尺寸后, 裂隙体数值模型微裂纹起裂模式见表5。表5显示: 保持张开度不变条件下, 随着预制裂隙长度的增加, 初始微裂纹起裂位置从预制裂隙中部向裂尖转移, 即与前文所述固支梁模型预测结果相一致, 验证了固支梁模型在预测张开裂隙微裂纹萌生机理方面的适用性。

表5 不同长度水平裂隙试件裂纹起裂模式以及预制裂隙附近位移场状态

Table 5 The crack initiation mode and the displacement field near the prefabricated fissure of the specimens with different lengths of horizontal fissure



5 预制裂隙面变形特征分析

5.1 数值模型预制裂隙周边环境设置

为了进一步分析加载过程中水平裂隙岩体预制裂隙面位移变化特征, 对建立的数值模型裂隙周边环境设置后, 再进行单轴压缩数值模拟试验, 图 10 为裂隙体数值模型黏结状态和裂隙周边环境处理图示。将预制裂隙面上方一层颗粒和下方一层颗粒分别创建分组并命名为 Group_above 和 Group_below, 并通过 FISH 语言监测并记录两组颗粒的竖向位移数据。对上组全部颗粒和下组全部颗粒的位移取平均值, 再将上下两组竖向平均位移的绝对值相加, 为预制裂隙面竖向变形量。相比测量圆而言, 直接监测裂隙面颗粒的位移数据可以更精准的获取预制裂隙面变形数据。

5.2 预制裂隙面变形特征分析

水平裂隙数值模型单轴压缩过程中预制裂隙面竖向位移演化过程曲线如图 11 所示。由图 11 可得: 0.1~0.4 mm 张开度裂隙模型在单轴压缩过程中预制裂隙面变形量均达到了相应的裂隙张开度, 裂隙张开度越小到达越早, 表明加载过程中, 此张开度区间预制裂隙面均发生接触闭合现象, 且由于 0.1 mm 张开度裂隙的张开度过小, 在加载中前期就已出现裂隙面闭合现象。

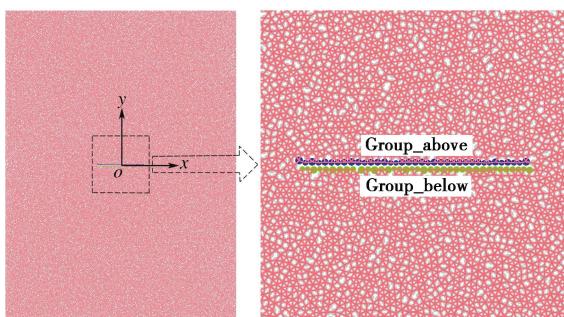


图 10 张开度 0.1 mm 下水平裂隙数值模型处理图

Fig. 10 Processing chart of horizontal fissure model with aperture of 0.1 mm

值得注意的是: 图 11 所示预制裂隙面竖向位移量为裂隙长度范围内颗粒位移量的平均值, 但是在预制裂隙闭合前, 在均布荷载作用下裂隙面将发生光滑连续的挠曲变形, 因此, 预制裂隙跨中挠度大于图 11 所示裂隙面平均竖向位移。

对加载步数位于 40000~56000 步之间的裂隙面竖向位移曲线放大发现: 不同张开度裂隙试件裂隙面竖向位移曲线均出现了转折点, 张开度从 0.8 mm 到 0.1 mm 出现的转折点分别为 A, B, C, D 点, 且转折点出现的计算时步与微裂纹起裂的计算时步基本一致, 即微裂纹起裂的同时裂隙面竖向位移出现突变, 这是与微裂纹萌生导致裂隙面竖向位移突变相吻合。

但是图 11 所示的 A, B, C, D 点, 并没有在同一位置, 而是分布于 0.06~0.07 mm 之间, 并随张开度的增大而减小, 这与固支梁模型给定的式(3)所揭示规律并不一致, 这是因为, 基于固支梁模型得到的公式(3), 是建立在张开裂隙面两端为固定支座的假设基础上得到的, 但是实际情况下, 裂隙面两端并不严格满足固定支座条件, 而且支座约束能力将随张开度的增大而减弱, 相应地, 临界挠度值将变大。

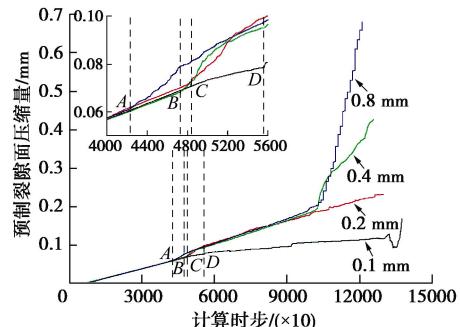


图 11 不同张开度裂隙面竖向位移演化过程曲线

Fig. 11 Evolution curves of vertical displacement of fissure surfaces with different apertures

6 结 论

通过对水泥砂浆材料制备的含水平裂隙类岩体试件进行单轴压缩试验, 发现张开裂隙微裂纹发育规律受张开度的影响, 据此提出固支梁简化计算力学分析模型用以分析和阐释张开度影响机理, 得到以下结论:

(1) 室内测试与数值模拟试验揭示: 随预制水平裂隙张开度的增大, 水平裂隙类岩体试件微裂纹起裂位置从预制裂隙尖端向中部转移; 张开度越大, 预制裂隙中部发育的拉伸微裂纹扩展路径越长; 剪切裂纹的发育和扩展使得预制裂隙中部拉伸裂纹闭合甚至消失。

(2) 结合室内测试及数值模拟试验中裂隙面上微裂纹发育规律及扩展模式, 提出了用于阐释张开裂隙微裂纹萌生机理的固支梁模型, 并基于数值计算模型对所提出的固支梁模型的适用性进行验证。

(3) 在阐明固支梁模型适用性的基础上, 对张开裂隙微裂纹萌生机理进行分析和探索。

参 考 文 献:

- [1] CAO P, LIU T, PU C, et al. Crack propagation and coalescence of brittle rock-like specimens with pre-existing cracks in compression[J]. Engineering Geology, 2015, 187: 113~121.
- [2] CHENG H, ZHOU X, ZHU J, et al. The effects of crack openings on crack initiation, propagation and coalescence behavior in rock-like materials under uniaxial compression[J].

- Rock Mechanics & Rock Engineering, 2016, **49**(9): 1 - 14.
- [3] WONG L N Y. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, **46**(2): 239 - 249.
- [4] ZHANG X P, WONG L N Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: a numerical study based on parallel bonded-particle model approach[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, **45**(5): 711 - 737.
- [5] 刘伟韬, 申建军. 含单裂纹真实岩石试件断裂模式的力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(6): 1182 - 1189. (LIU Wei-tao, SHEN Jian-jun. Experimental study of propagation mode of crack in real rock specimens with a single crack[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(6): 1182 - 1189. (in Chinese))
- [6] WANG Y, TANG J, DAI Z, et al. Experimental study on mechanical properties and failure modes of low-strength rock samples containing different fissures under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, **197**: 1 - 20.
- [7] 王桂林, 张亮, 许明, 等. 单轴压缩下非贯通节理岩体损伤破坏能量演化机制研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 639 - 647. (WANG Gui-lin, ZHANG Liang, XU Ming, et al. Energy damage evolution mechanism of non-across jointed rock mass under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 639 - 647. (in Chinese))
- [8] 胡波, 杨圣奇, 徐鹏, 等. 单裂隙砂岩蠕变模型参数时间尺度效应及颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 864 - 873. (HU Bo, YANG Sheng-qi, XU Peng, et al. Time-scale effect of the creep model parameters and particle flow simulation of sandstone with a single crack[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(5): 864 - 873. (in Chinese))
- [9] 王斌, 宁勇, 冯涛, 等. 单轴压缩条件下锚杆影响脆性岩体破裂的细观机制[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1593 - 1600. (WANG Bin, NING Yong, FENG Tao, et al. Meso-mechanism of rock failure influenced by bolt anchorage under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(9): 1593 - 1600. (in Chinese))
- [10] 蒋明镜, 张宁, 申志福, 等. 含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机制离散元分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(11): 3293 - 3301. (JIANG Ming-jing, ZHANG Ning, SHEN Zhi-fu, et al. DEM analyses of crack propagation in flawed rock mass under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(11): 3293 - 3301. (in Chinese))
- [11] 袁媛, 潘鹏志, 赵善坤, 等. 基于数字图像相关法的含填充裂隙大理岩单轴压缩破坏过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(2): 339 - 351. (YUAN Yuan, PAN Peng-zhi, ZHAO Shan-kun, et al. The failure process of marble with filled crack under uniaxial compression based on digital image correlation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(2): 339 - 351. (in Chinese))
- [12] 左江江, 李臣林, 腾俊洋, 等. 充填物对含孔洞大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 工程科学学报, 2018, **40**(7): 776 - 782. (ZUO Jiang-jiang, LI Chen-lin, TENG Jun-yang, et al. Experimental study of the influence of the filling material on the mechanical properties of marble with holes[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, **40**(7): 776 - 782. (in Chinese))
- [13] 郭奇峰, 武旭, 蔡美峰, 等. 预制裂隙花岗岩的强度特征与破坏模式试验[J]. 工程科学学报, 2019, **41**(1): 43 - 52. (GUO Qi-feng, WU Xu, CAI Mei-feng, et al. Experiment on the strength characteristics and failure modes of granite with pre-existing cracks[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, **41**(1): 43 - 52. (in Chinese))
- [14] LIU T, LIN B, ZOU Q, et al. Mechanical behaviors and failure processes of precracked specimens under uniaxial compression: a perspective from microscopic displacement patterns[J]. Tectonophysics, 2016(672/673): 104 - 120.
- [15] LIU T, LIN B, YANG W. Mechanical behavior and failure mechanism of pre-cracked specimen under uniaxial compression[J]. Tectonophysics, 2017(712/713): 330 - 343.
- [16] JIN J, CAO P, CHEN Y, et al. Influence of single flaw on the failure process and energy mechanics of rock-like material[J]. Computers & Geotechnics, 2017, **86**: 150 - 162.
- [17] MIAO S, PAN P, WU Z, et al. Fracture analysis of sandstone with a single filled flaw under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, **204**: 319 - 343.
- [18] 蒲成志, 曹平, 陈瑜, 等. 不同裂隙相对张开度下类岩石材料断裂试验与破坏机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(8): 2394 - 2399. (PU Cheng-zhi, CAO Ping, CHEN Yu, et al. Fracture test and failure mechanism of rock-like material of relatively different fracture apertures[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),

- 2011, **42**(8): 2394 – 2399. (in Chinese))
- [19] ZHANG X P, ZHANG Q, WU S. Acoustic emission characteristics of the rock-like material containing a single flaw under different compressive loading rates[J]. Computers & Geotechnics, 2017, **83**: 83 – 97.
- [20] 李夕兵, 罗琳, 黎崇金. 考虑岩石交界面方向效应的巴西劈裂试验研究[J]. 工程科学学报, 2017, **39**(9): 1295 – 1304. (LI Xi-bing, LUO Lin, LI Chong-jin. Experimental study of directivity effect of rock interface under Brazilian splitting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, **39**(9): 1295 – 1304. (in Chinese))
- [21] YANG S Q, TIAN W L, HUANG Y H. Failure mechanical behavior of pre-holed granite specimens after elevated temperature treatment by particle flow code[J]. Geothermics, 2018, **72**: 124 – 137.
- [22] 岑夺丰, 黄达. 高应变率单轴压缩下岩体裂隙扩展的细观位移模式[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(3): 436 – 444. (CEN Duo-feng, HUANG Da. Mesoscopic displacement modes of crack propagation of rock mass under uniaxial compression with high strain rate[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(3): 436 – 444. (in Chinese))
- [23] ZHANG X P, LIU Q, WU S, et al. Crack coalescence between two non-parallel flaws in rock-like material under uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2015, **199**: 74 – 90.
- [24] 黄丹, 李小青. 基于微裂纹发育特性的大理岩特征强度数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(1): 253 – 262. (HUANG Dan, LI Xiao-qing. Numerical simulation research on characteristic strength of marble based on development of microcrack[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(1): 253 – 262. (in Chinese))
- [25] 张科, 刘享华, 李昆, 等. 含孔多裂隙岩石力学特性与破裂分形维数相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(12): 2785 – 2794. (ZHANG Ke, LIU Xiang-hua, LI Kun, et al. Investigation on correlation between mechanical characteristic and fractal dimension of fracturing of rock containing a hole and multi-flaws[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(12): 2785 – 2794. (in Chinese))